

РАЗРАБОТКА ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Крючков А.Н.,
Ермилов М.А.,
Баляба М.В.,
Ермилова Е.Н.,
Видяскина А.Н.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, 34, г.Самара,
443086, Российская Федерация

kan250462@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы создания гасителей колебаний давления рабочей среды для решения задачи снижения гидродинамического шума в трубопроводных системах. Установлено, что для решения задачи снижения гидродинамического шума возможно применение реактивных камерных гасителей колебаний при выполнении условия ограничения габаритных размеров и собственного турбулентного шума, излучаемого узким центральным каналом реактивного гасителя колебаний. Показано, что выполнение требований по низким уровням собственного шума таких гасителей приводит к значительному росту их габаритных размеров, что недопустимо для трубопроводных систем бортовых транспортных средств.

Ключевые слова: трубопроводные системы; гидродинамический шум; глушители гидродинамического шума; гасители колебаний давления жидкости

1 Введение

Тема данной статьи связана с проблемой снижения колебаний давления рабочей среды и шумности трубопроводных систем [1, 4], имеющих широкое применение в самых различных отраслях промышленности и транспорта. В состав любых трубопроводных систем входят источники энергии (насосы, компрессоры, вентиляторы и пр.), сообщающие рабочей среде необходимую энергию, потребители (механизмы, оборудование, теплообменные аппараты и т.д.), использующие эту энергию, и сеть трубопроводов, по которым эта энергия передается от источников к потребителям. В случае невозможности снижения акустической мощности основных источников колебаний (насосов, компрессоров и дроссельной арматуры) используют устройства снижения передачи акустической энергии на путях её распространения – гасители колебаний и глушители гидродинамического шума (ГДШ).

Отметим, что термины «гаситель пульсаций давления жидкости» и

«глушитель ГДШ» являются в контексте настоящей статьи синонимами, поскольку предназначены для снижения колебаний акустического давления рабочей жидкости в гидросистеме. Данные термины использовались исторически в разных технических отраслях: гасители – в авиационной технике, где требовалось, главным образом, обеспечение надёжности [5, 6, 10], а глушители – в судовых системах, в которых необходимо, прежде всего, обеспечение малозумности оборудования [4, 9]. Особенность данной статьи заключается в том, что для снижения ГДШ используются методы проектирования гасителей, детально разработанные для авиационных гидросистем, и в источниках, на которые ссылаются авторы, эти устройства именуются как гасители колебаний (или пульсаций). В то же время, объектом внедрения данных устройств являются судовые системы, в которых подобные устройства относят к глушителям ГДШ (ГГДШ). Исходя из этого, авторы используют в дальнейшем изложении эти равнозначные термины.

2 Условия применимости реактивных глушителей

Согласно многочисленным трудам в рассматриваемой области [6, 7, 8, 10, 12], различают гасители колебаний реактивного и диссипативного типа. Гасители колебаний, состоящие из реактивных элементов, работают как акустические фильтры, препятствующие прохождению колебаний определённых частот от источника в трубопроводную цепь. Эти частоты зависят от массы и упругости рабочей среды в элементах гасителя. Простейшими гасителями реактивного типа являются камерные, резонансные и интерференционные [7].

Рассмотрим границы применимости реактивных глушителей для снижения ГДШ в трубопроводных системах. Глушители реактивного типа широко используются для снижения высокоинтенсивных колебаний давления в гидравлических системах, например, вследствие работы поршневых и плунжерных насосов, автоколебаний клапанов и пр. Амплитуды данных пульсаций давления достигают значений 0,5...3 МПа, что соответствует 208...215 дБ. Однако для снижения ГДШ, уровни которого значительно меньше и составляют 100...160 дБ, при этом необходимо учитывать собственный шум глушителей.

Конструкция реактивного (камерного) глушителя ГДШ предполагает наличие центрального канала, пропускающего основной расход среды, при увеличении которого (сопровождающегося ростом скорости в канале) наблюдается значительное увеличение собственного ГДШ глушителя. Поэтому условием применимости глушителя реактивного типа является ограничение его собственного шума, возникающего в центральном канале, и для его снижения необходимо уменьшить скорость течения среды или увеличить диаметр канала [13]. Однако это приводит,

руководствуясь теорией подобия, к увеличению габаритных размеров устройства для сохранения инерционных свойств центрального канала. Поэтому применимость реактивных ГГДШ зависит от разности его требуемой акустической эффективности $\Delta L_{гр}$ и собственного шума ΔL_c , а также от габаритных ограничений на ГГДШ.

В частности, для разработанного авторами ГГДШ для гидравлического испытательного стенда (рисунок 1) эффективность составила 21-25 дБ для диапазона частот от 20 до 800 Гц. Однако при увеличении расхода от 25 м³/ч до 100 м³/ч она уменьшалась до 2-5 дБ на данных частотах и становилась отрицательной на низких (меньше 20 Гц) и высоких (более 300 Гц).

По изменению эффективности глушителя (рисунок 2) относительно рабочего расхода стендового глушителя авторами определена зависимость эффективности и генерации собственного ГДШ от скорости потока (рисунок 3). Установлена минимальная скорость, при которой не наблюдается заметного увеличения собственного ГДШ (3 м/с для требуемой эффективности имеющейся конструкции).

При отсутствии габаритных ограничений возможна его эксплуатация на основных рабочих режимах до расхода 40 м³/ч. Относительные габариты разработанного устройства составили:

$$\begin{aligned} \frac{D_{ггдш}}{D_{тр}} &= \frac{700}{200} = 3,5, \\ \frac{L_{ггдш}}{D_{тр}} &= \frac{850}{200} = 4,25, \end{aligned} \quad (1)$$

где $D_{ггдш}$, $L_{ггдш}$ – диаметр и длина глушителя соответственно; $D_{тр}$ – диаметр трубопровода.

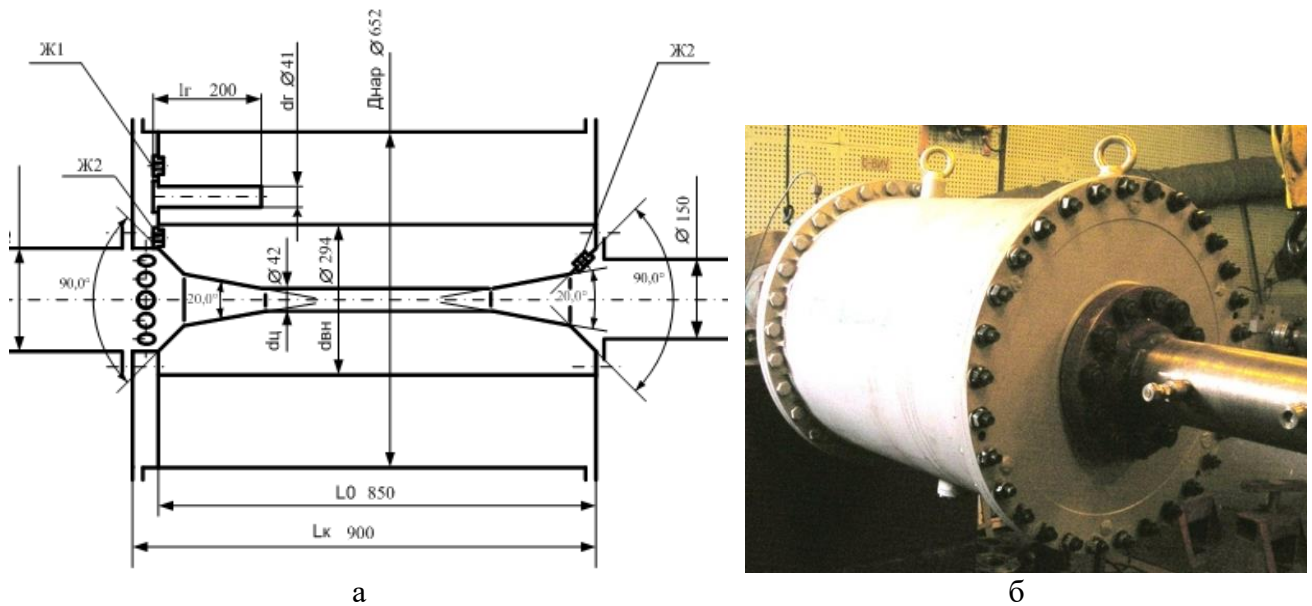


Рисунок 1. Глушитель ГДШ

а) – принципиальная схема стенового глушителя ГДШ; б) – внешний вид глушителя на стенде

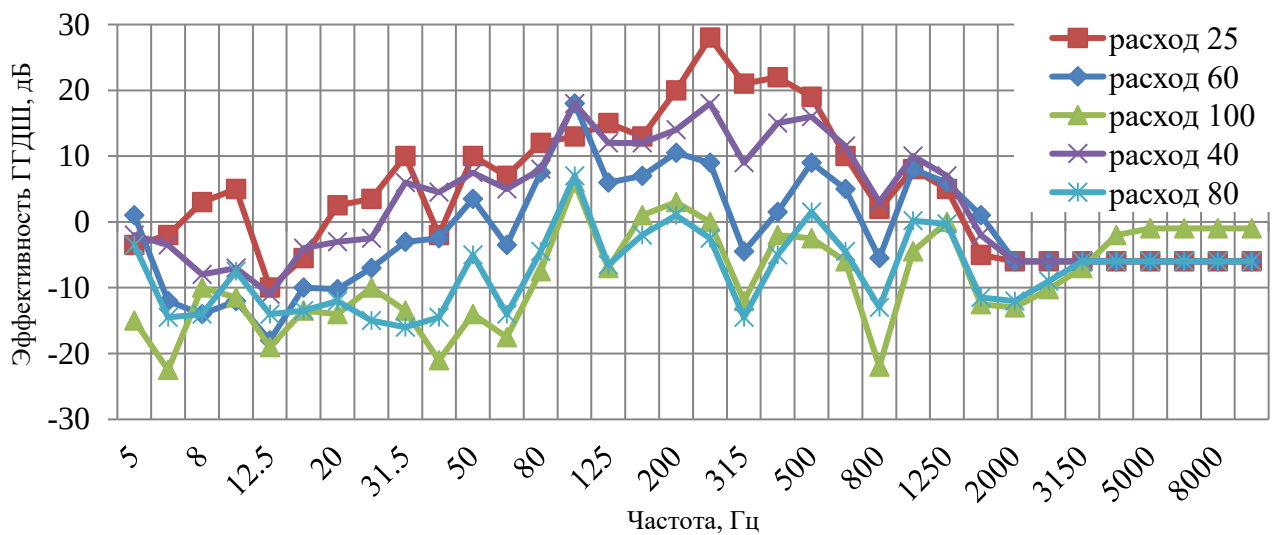


Рисунок 2. Изменение спектра эффективности ГДШ от расхода жидкости (м³/ч)

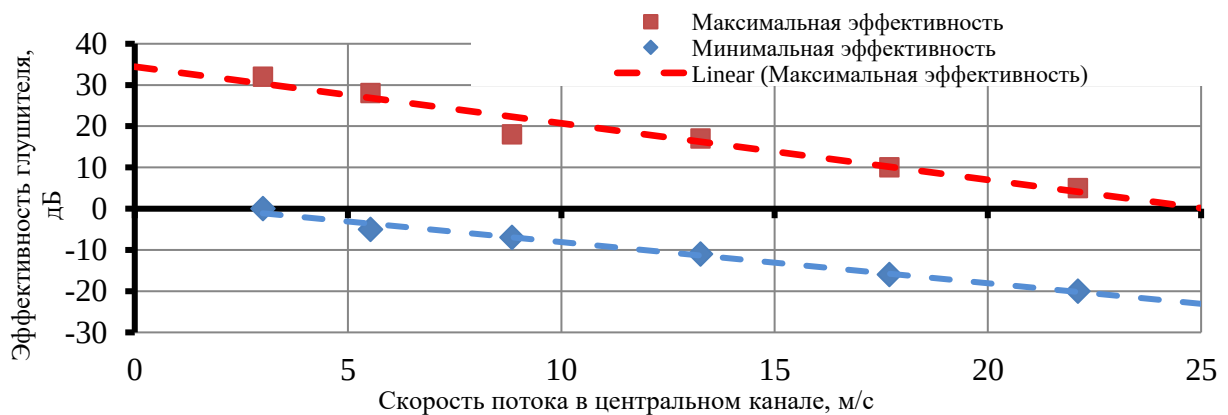


Рисунок 3. Зависимость эффективности гасителя от максимальной скорости

При наличии жёстких габаритных ограничений, например, для штатного глушителя системы охлаждения корабельной энергоустановки

$$\bar{D}_{ГГДШ} = \frac{D_{ГГДШ}}{D_{тр}} = \frac{375}{100} = 3,7 \leq [\bar{D}_{ГГДШ}]_{доп} = 2,5, \quad (2)$$

$$\bar{L}_{ГГДШ} = \frac{L_{ГГДШ}}{D_{тр}} = \frac{1200}{100} = 12 \leq [\bar{L}_{ГГДШ}]_{доп} = 5, \quad (3)$$

где $\bar{D}_{ГГДШ}$, $\bar{L}_{ГГДШ}$ – относительные диаметр и длина глушителя соответственно; $[\bar{D}_{ГГДШ}]_{доп}$, $[\bar{L}_{ГГДШ}]_{доп}$ – предельно допустимые значения $\bar{D}_{ГГДШ}$ и $\bar{L}_{ГГДШ}$.

Условия (2), (3) не выполняются, поэтому применение реактивного камерного глушителя является неприемлемым. Таким образом, условия применимости реактивных глушителей можно сформулировать следующим образом:

1. Максимальная скорость потока не должна превышать предельное значение,

зависящее от акустической эффективности ГГДШ (в случае вышеуказанного стендового ГГДШ это 3 м/с), $V_{ГГДШ}^{max} < V_{тр}$;

2. Эффективность ГГДШ должна быть больше требуемой на величину уровня собственного ГГДШ, $\Delta L_{ГГДШ} > \Delta L_{тр}$;

3. Относительный диаметр и длина ГГДШ не должны превышать требуемые:

$$\bar{D}_{ГГДШ} \leq [\bar{D}_{ГГДШ}]_{доп}, \quad (4)$$

$$\bar{L}_{ГГДШ} \leq [\bar{L}_{ГГДШ}]_{доп}. \quad (5)$$

3 Создание трёхкамерного судового ГГДШ

Стендовый ГГДШ (рисунок 1) удовлетворяет данным требованиям, поэтому успешно эксплуатируется с 2009 года. Однако к бортовым судовым агрегатам предъявляются более жесткие габаритные требования.

Опыт разработки и эксплуатации стендового глушителя учтён при создании трехкамерного судового ГГДШ (рисунок 4).

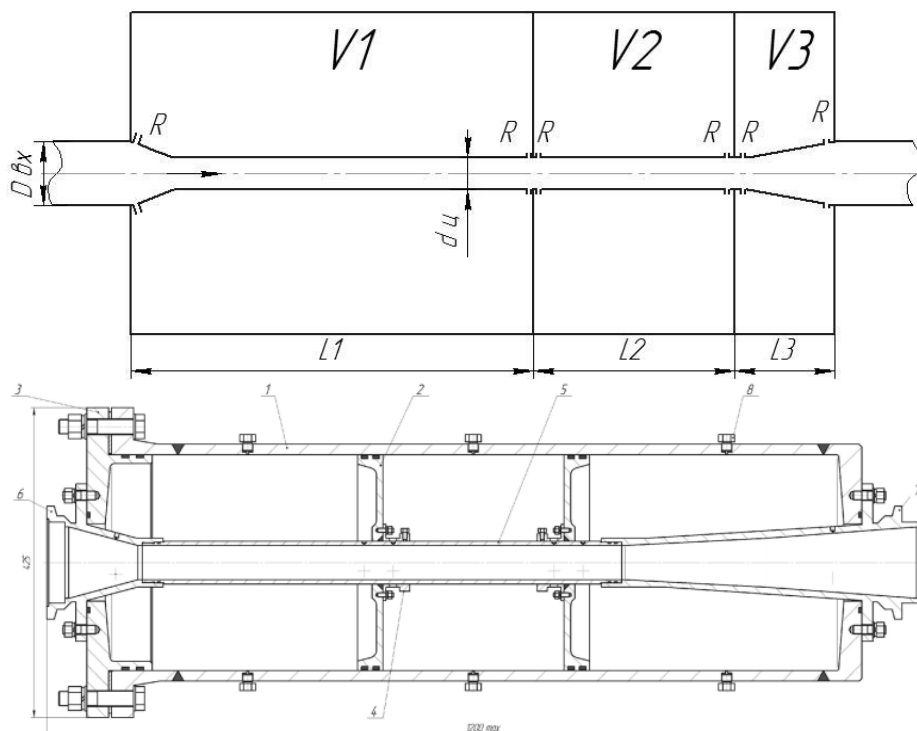


Рисунок 4. Принципиальная расчётная и конструктивная схема многокамерного судового ГГДШ

С учётом установленной зависимости возбуждения собственного ГДШ от максимальной скорости и требуемой акустической эффективности диаметр центрального канала и длина выходного конуса были значительно увеличены в целях уменьшения скорости жидкости в центральном канале до 3 м/с при сохранении требуемой индуктивности канала.

Увеличение размеров центрального канала привело к значительному росту габаритов глушителя. Его теоретическая эффективность, рассчитанная методом четырехполюсников, представлена на рисунке 5.

Для требуемой эффективности относительные габариты ГГДШ составили:

$$\bar{D} = 3,75, \text{ при } \bar{D}_{MAX} = 2,5;$$

$$\bar{L} = 12, \text{ при } \bar{L}_{MAX} = 5.$$

Разработанный глушитель удовлетворял всем требованиям, кроме габаритных. На рисунке 6 приведено сравнение рассчитанных габаритных размеров с предельно допустимыми, которое показало неприемлемость применения ГГДШ реактивного типа для снижения ГДШ трубопроводной арматуры. Возникла проблема снижения шумности арматуры за счет поиска альтернативных принципов действия глушителей. К таким глушителям относят диссипативные ГГДШ, работающие на принципе рассеяния акустической энергии.

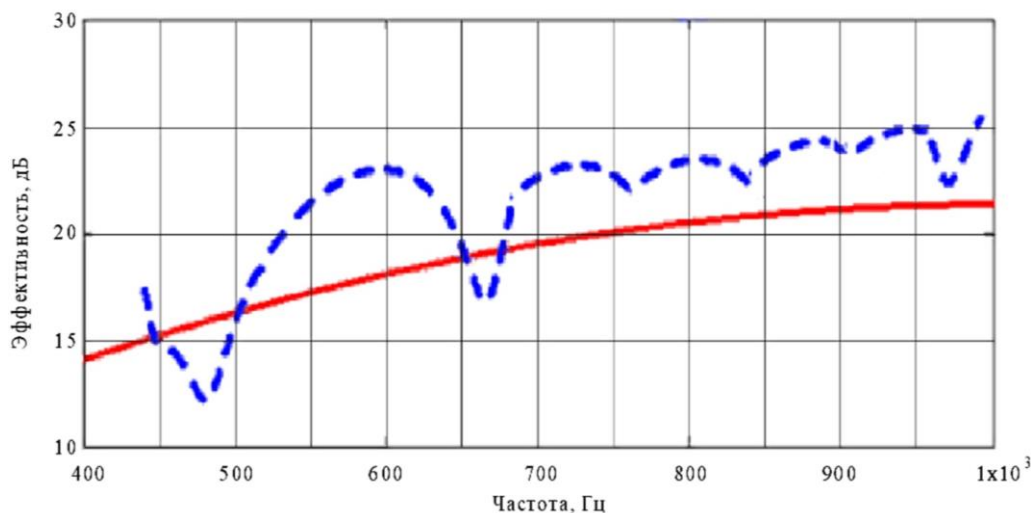


Рисунок 5. Необходимая (красная линия) и теоретическая (синяя линия) эффективность многокамерного реактивного гасителя

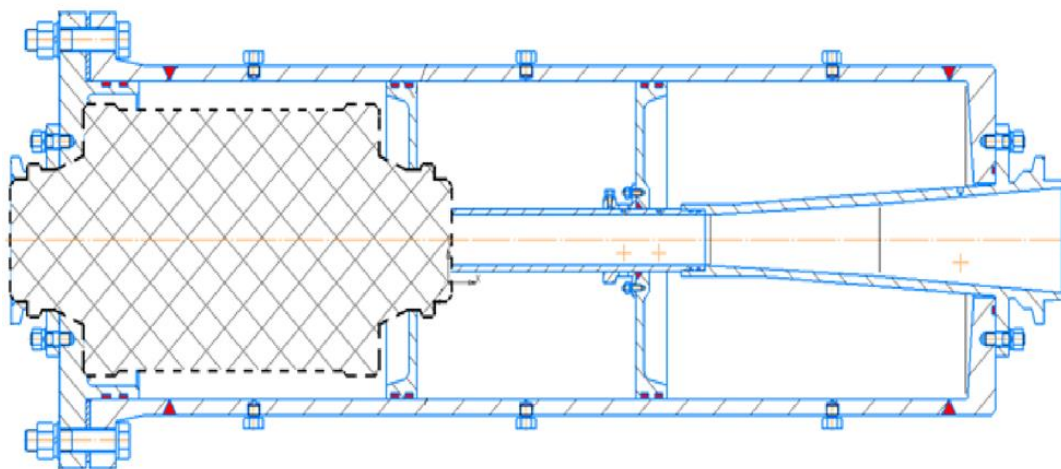


Рисунок 6. Качественное сравнение расчетных габаритов камерного глушителя и требуемые ограничения (заштрихованный контур)

4 Заключение

1. Решение проблемы повышенных колебаний давления рабочей среды и ГДШ трубопроводных систем различного назначения может быть успешно реализовано за счёт использования реактивных камерных гасителей колебаний, рассчитываемых на основе электроакустических аналогий и метода четырехполюсника.

2. Недостатком камерных глушителей ГДШ является генерация их собственного шума, определяемого скоростью рабочей среды в их центральном канале, для компенсации которого требуется увеличение их габаритных размеров. Рост габаритов устройств определяется их требуемой акустической эффективностью, расходом рабочей жидкости и частотным диапазоном эффективной работы.

Список использованных источников

- [1] Bies, D.A. Engineering noise control [Text] / D.A. Bies, C.H. Hansen. – London and New York.: Spoon Press. – 2003. – 745 p.
- [2] IEC 60534-8_4 Industrial Process Control Valves – Noise Considerations 2015.
- [3] Pedersen, R.C. Quantification of acoustic and hydrodynamic fields in flow duct systems [Text] / R.C. Pedersen, M. P. Norton // Applied Acoustics. – 1997. – V. 50. – No 3. – P. 205-230.
- [4] Берестовицкий, Ю.А. Снижение вибрации и шума гидравлических приборов систем управления техническими средствами [Текст] / Э.Г. Берестовицкий, Ю.А. Гладилин, В.И. Голованов [и др.]. – СПб.: Астерион, 2008. – 316 с.
- [5] Гимадиев, А.Г. Разработка гасителей колебаний для обеспечения устойчивости системы автоматического регулирования давления масла

двигателя НК-16СТ [Текст] / А.Г. Гимадиев, В.А. Букин // Проблемы динамики пневмогидравлических и топливных систем летательных аппаратов: Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. – 1990. – 21 с.

[6] Головин, А.Н. Акустические характеристики и параметры элементов гасителей колебаний [Текст] / А.Н. Головин // Вестник СГАУ. – 2003. – Спец. вып. Ч. 2. – С. 330-336.

[7] Головин, А.Н. Гасители колебаний для гидравлических систем [Текст] / А.Н. Головин, В.П. Шорин. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2005. – 168 с.

[8] Головин, А.Н. Структура автоматизированного расчета гасителей колебаний давления [Текст] / А.Н. Головин, Г.В. Шестаков // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов. – 1988. – С. 20-25.

[9] Ермилов, М.А. Защита измерительного участка гидравлического стенда от виброакустических помех [Текст] / М.А. Ермилов, А.Н. Видяскина, А.Н. Крючков // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Сборник материалов и докладов. – 2020. – С. 66-73.

[10] Иголкин, А.А. Снижение колебаний и шума в пневмогидромеханических системах [Текст] / А.А. Иголкин, А.Н. Крючков, Г.М. Макарьянц [и др.]. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2005. – 314 с.

[11] Крючков, А.Н. Разработка гасителя пульсаций давления для гидросистем энергоустановок [Текст] / А.Н. Крючков, М.А. Ермилов, Е.Н. Ермилова [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – № 2 (18). – С. 146-155.

[12] Иголкин, А.А. Снижение колебаний и шума в гидромеханических системах [Текст] / А.А. Иголкин, А.Н. Крючков, Г.М. Макарьянц [и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005. – 314 с.

[13] Юдин, Е.Я. Борьба с шумом [Текст] / Е.Я. Юдин. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1964. – 702 с.

A.N. Kryuchkov,
M.A. Ermilov,
M.V. Balyaba,
E.N. Ermilova,
A.N. Vidyaskina

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

kan250462@mail.ru

DEVELOPMENT OF VIBRATION DAMPERS OF THE POWER FLUID TO REDUCE HYDRODYNAMIC NOISE IN PIPELINE SYSTEMS

The article deals with the creation of dampers for pressure fluctuations of the working medium to solve the problem of reducing hydrodynamic noise in pipeline systems. It has been established that to solve this problem, it is possible to use reactive chamber vibration dampers provided that the condition of limiting the overall dimensions and the turbulent self-noise emitted by the narrow central channel is met. It is shown that meeting the requirements for a low self-noise level of such dampers leads to a significant increase in their overall dimensions, which is unacceptable for pipeline systems of on-board vehicles.

Keywords: pipeline systems, hydrodynamic noise, silencers of hydrodynamic noise, dampers of fluid pressure fluctuations

References

- [1] Bies, D.A. Engineering noise control [Text] / D.A. Bies, C.H. Hansen. – London and New York.: Spoon Press. – 2003. – 745 p.
- [2] IEC 60534-8_4 Industrial Process Control Valves – Noise Considerations 2015.
- [3] Pedersen, R.C. Quantification of acoustic and hydrodynamic fields in flow duct systems [Text] / R.C. Pedersen, M. P. Norton // Applied Acoustics. – 1997. – V. 50. – No 3. – P. 205-230.
- [4] Berestovitsky, E.G. Snizhenie shuma i shuma gidravlicheskih priborov sistem upravleniya tekhnicheskimi sredstvami [Reduction of noise and noise of hydraulic devices of control systems by technical equipment] [Text] / E.G. Berestovitsky, Yu.A. Gladilin, V.I. Golovanov [and others]. – St. Petersburg: Asterion Publ, 2008. – 316 p.
- [5] Gimadiev, A.G. Razrabotka gasitelej kolebanij dlya obespecheniya ustojchivosti sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya davleniya masla dvigatelya NK-16ST [Development of vibration dampers to ensure the stability of the automatic oil pressure control system for the NK-16ST engine] [Text] / A.G. Gimadiev, V.A. Bukin // Problemy dinamiki pnevmogidravlicheskih i toplivnyh sistem letatel'nyh apparatov: Tez. dokl. Vses. nauchn.-tekhn. konf. [Problems of the dynamics of pneumohydraulic and fuel systems of aircraft: Abstracts of All-Soviet Union scientific and technical conference] - 1990. – 21 p.
- [6] Golovin, A.N. Akusticheskie harakteristiki i parametry elementov gasitelej kolebanij [Acoustic characteristics and parameters of vibration damper elements] [Text] / A.N. Golovin // Vestnik SGAU. – 2003. – Spec. vyp. CH. 2. – P. 330-336.
- [7] Golovin, A.N. Gasiteli kolebanij dlya gidravlicheskih sistem [Oscillation dampers for hydraulic systems] [Text] / A.N. Golovin, V.P. Shorin. – Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2005. – 168 p.
- [8] Golovin, A.N. Struktura avtomatizirovannogo rascheta gasitelej kolebanij davleniya [The structure of automated calculation of pressure oscillation dampers] [Text] / A.N. Golovin, G.V. Shestakov // Dinamicheskie processy v silovyh i energeticheskikh ustanovkakh letatel'nyh apparatov [Dynamic processes in power plants of aircraft]. – 1988. – P. 20-25.
- [9] Ermilov, M.A. Zashchita izmeritel'nogo uchastka gidravlicheskogo stenda ot vibroakusticheskikh pomekh [Protection of the measuring section of the hydraulic stand from vibroacoustic interference] [Text] / M.A. Ermilov, A.N. Vidyaskina, A.N. Kryuchkov // Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumodynamics. XXIV International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates. Collection of materials and reports. – 2020. – P. 66-73.
- [10] Igolkin, A.A. Snizhenie kolebanij i shuma v pnevmogidromekhanicheskikh sistemah [Reduction of oscillations and noise in pneumohydraulic systems] [Text] / A.A. Igolkin, A.N. Kryuchkov, G.M. Makaryants [and others]. – Samara: Izd-vo SNC RAN, 2005. – 314 p.
- [11] Kryuchkov, A.N. Razrabotka gasitelya pul'sacij davleniya dlya gidrosistem energoustanovok [Development of a pressure pulsation damper for hydraulic systems of power plants] [Text] / A.N. Kryuchkov, M.A. Ermilov, E.N. Ermilova [and others] // Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie [Vestnik of samara university. Aerospace and mechanical engineering]. – 2019. – № 2 (18). – P. 146-155.

[12] Igolkin, A.A. Snizhenie kolebanij i shuma v gidromekhanicheskikh sistemah [Reduction of oscillations and noise in hydromechanical systems] [Text] / A.A. Igolkin, A.N. Kryuchkov, G.M. Makaryants [and others]. - Samara: Izd-vo SGAU, 2005. - 314 p.

[13] Yudin, E.Ya. Bor'ba s shumom [Noise control] [Text] / E.Ya. Yudin. - Moscow: Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1964. – 702 p.